

АЛГОРИТМ СШИВКИ КАДРОВ СЛОЯ ТОПОЛОГИИ СБИС ПО КЛЮЧЕВЫМ ТОЧКАМ

Введение. При изготовлении сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) важным является контроль технологических процессов и экспресс-анализ их результатов. В качестве исходных данных используется изображение слоя интегральной схемы, которое может быть получено с помощью стандартных или специальных устройств и оборудования для получения цифровых изображений топологических слоев СБИС и предоставляется в виде множества прямоугольных фрагментов (кадров) изображения одного масштаба. Фрагменты изображения могут налагаться друг на друга, при этом известны размеры перекрытий. Особенностью многокадровых изображений топологических слоев СБИС является неоднородность яркости и увеличение объема данных из-за перекрытий кадров. При этом имеются также искажения, обусловленные эффектом перспективы, нечеткой фокусировкой на границе кадра, разной высотой и присутствием тени, поворота.

Этапы обработки изображения может сильно варьировать в зависимости от конкретной цели анализа, при этом обязательным этапом является формирование полного изображения по совокупности кадров (сшивка кадров) [1]. Задача сшивки формулируется следующим образом.

Растровое изображение задано в виде матрицы $[P_{i,j}]$ частично перекрывающихся кадров, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$. Пусть неориентированный граф $G = (N, R)$ задает отношение соседства кадров (такие кадры частично перекрываются), где N – множество вершин графа, поставленных в соответствие кадрам, а R – множество ребер графа, задающих отношение соседства пары кадров. Для простоты будем рассматривать соседство лишь по вертикали и горизонтали. Тогда для матрицы $[P_{i,j}]$ размерности $n \times m$ имеем: $N = \{n_{i,j} | i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ – множество вершин, а $R = \{r_k | k = 1, 2, \dots, 2nm - m - n\}$ – множество ребер. Зададим S_h и S_v – размеры перекрытия соседних кадров по горизонтали и вертикали соответственно, а также допустимое отклонение перекрытия по горизонтали Δh и по вертикали Δv .

Определим функцию совмещения двух кадров P_1 и P_2 в перекрываемых областях для разных положений кадров относительно друг друга как функцию расстояния $d(P_1, P_2, h, v)$ в некоторой метрике, где h и v – смещения кадров изображений относительно заданных S_h и S_v по горизонтали и вертикали соответственно, $-\Delta h \leq h \leq \Delta h$, $-\Delta v \leq v \leq \Delta v$. Для удобства запишем $d(P_1, P_2, h, v) = d(r_i, h, v)$, где r_i – дуга графа G , определяющая соседство между кадрами P_1 и P_2 .

Задача сшивки заключается в нахождении такого расположения кадров, чтобы значение функции g было минимальным:

$$g = \sum_{i=1}^{2mn-m-n} d(r_i, h, v) \rightarrow \min,$$

При проектных нормах меньше 1 мкм и использовании современных оптических и растрово-электронных микроскопов возникают значительные трудности при формировании целого изображения всего слоя топологии кристалла алгоритмами [1] для современных микросхем, характеризующихся повышенной сложностью топологии. Поэтому разработка новых более эффективных алгоритмов решения задачи сшивки из кадров слоя топологии микросхемы является актуальной.

В статье предлагается алгоритм, позволяющий существенно сократить перебор при решении задачи сшивки путем нахождения на кадрах множества ключевых точек, которые

затем используются при нахождении оптимального совмещения кадров в областях их перекрытий.

Алгоритм сшивки. Алгоритм сшивки кадров слоя топологии ИС по ключевым точкам содержит два этапа:

1. Вычисление для множества ребер R графа G смещений кадров относительно друг друга на основе поиска ключевых точек.
2. Коррекция расположения кадров слоя. Выделение первого этапа необходимо для оптимизации вычислений путем распараллеливания.

Первый этап содержит следующие шаги для всех ребер из R в области перекрытия двух кадров P_1 и P_2 :

1. Выполняется поиск ключевых точек и вычисление их дескрипторов.
2. Выделяются соответствующие друг другу ключевые точки.
3. Удаляются ложные ключевые точки.
4. Вычисляется смещение кадра P_2 относительно позиции кадра P_1 .
5. Вычисляется расстояние d для пары кадров.
6. Вычисляется значение веса ребра как взвешенная сумма нормированного числа найденных ключевых точек и нормированной разности начального значения расстояния d_1 и значения d_2 после смещения. Вес ребра выполняет роль оценки качества найденного смещения для двух кадров.

Для выполнения первого этапа были протестированы следующие алгоритмы поиска ключевых точек и описания дескрипторов: SIFT, SURF [3], ORB [4]. Также сравнение проводилось для метода скользящего просмотра [4]. Тестирование проводилось на данных СБИС iW1696, 7 слоев, размер кадра 640x480 пикселей, размер области перекрытия 46x28, 506 кадров на один слой, общее число кадров 3542, 462 перекрытий на один слой, общее число перекрытий 3234, общий размер одного слоя данных 455 Мб, общий размер данных 3185 Мб. Результаты представлены в таблице. Как видно из таблицы алгоритм SIFT показал наименьшее число ошибок поиска ключевых точек для изображений ИС и высокую производительность.

Таблица – Сравнение производительности и точности алгоритмов

Наименование алгоритма	Время выполнения, с	Верно определённые смещения, %
SIFT	47	96
SURF	52	79
ORB	45	76
Метод скользящего просмотра	22	72

На основе множества ребер R с соответствующими смещениями и весами осуществляется построение полного изображения слоя топологии ИС. Построение полного изображения представляет собой поиск маршрута по ребрам R соединяющего все вершины N графа G с максимальным весом, по данному маршруту происходит сдвиг кадров по соответствующим ребрам смещениям. Поиск выполняется для четырех соседних кадров, последовательно по строкам. Пример приведен на рис. 2 и рис. 3.

Для четырех соседних кадров при формировании маршрута возможны три случая(рис. 2):

- Фиксирован только начальный кадр и выполняются поиск маршрута с максимальным весом для 3 соседних кадров. Возникает один раз для первого кадра матрицы $[P_i, j]$ и его соседей.

- Фиксированы два кадра, либо по горизонтали, либо по вертикали. Выполняется поиск маршрута с максимальным весом для 2 соседних кадров. Возникает для кадров первой строки и первого столбца матрицы $[P_i, j]$.
- Фиксированы 3 кадра. Для оставшегося кадра в четверке выбирается один из двух ребер с максимальным весом. Возникает в остальных случаях.
Кадр определяется фиксированным, если до него уже найден путь.
Алгоритм состоит из следующих шагов:
 1. Кадр с индексом $(0,0)$ фиксируется по своим текущим координатам, то есть местоположение кадра определяется как найденное (кадр А на рис. 1).
 2. Для соседних незафиксированных кадров в четверке (кадры В, С и D) строится маршрут корректировки с максимальным весом. Данная процедура включает следующие шаги:
 - а) Сортировка ребер по весу.
 - б) Формирование маршрута корректировки от фиксированного кадра в порядке уменьшения веса, таким образом, худшее ребро не участвует в маршруте.
 - с) Последовательная корректировка координат и фиксирование кадров по маршруту.
 - д) Если координаты последнего кадра в маршруте и координаты этого кадра, полученного смещением по худшему ребру, отличаются, то вносится дополнительно обратная корректировка для координат кадров в маршруте.
 3. Вычисление переходит на следующий кадр в строке, то есть следующий кадр в строке занимает позицию кадра А в схеме по рис. 1.
 4. Если достигнут конец строки перейти на следующую строку.
 5. Если не достигнут конец схемы повторить пункт 2.
 Таким образом, формируется полный маршрут объединения кадров в изображение ИС.

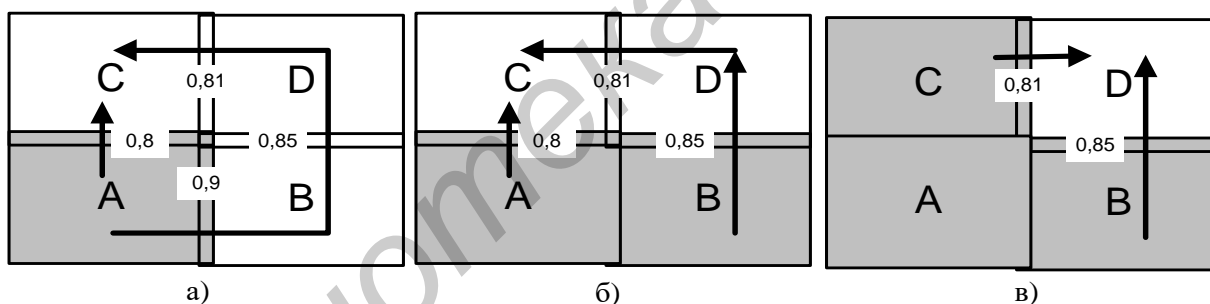


Рис. 1. Три случая при формировании маршрута, веса ребер приведены для наглядности, длинная стрелка – маршрут, короткая – оценка по худшей паре, серый цвет кадра – кадр зафиксирован: фиксирован только начальный кадр (а);
 фиксированы два кадра (б);
 в) фиксированы 3 кадра

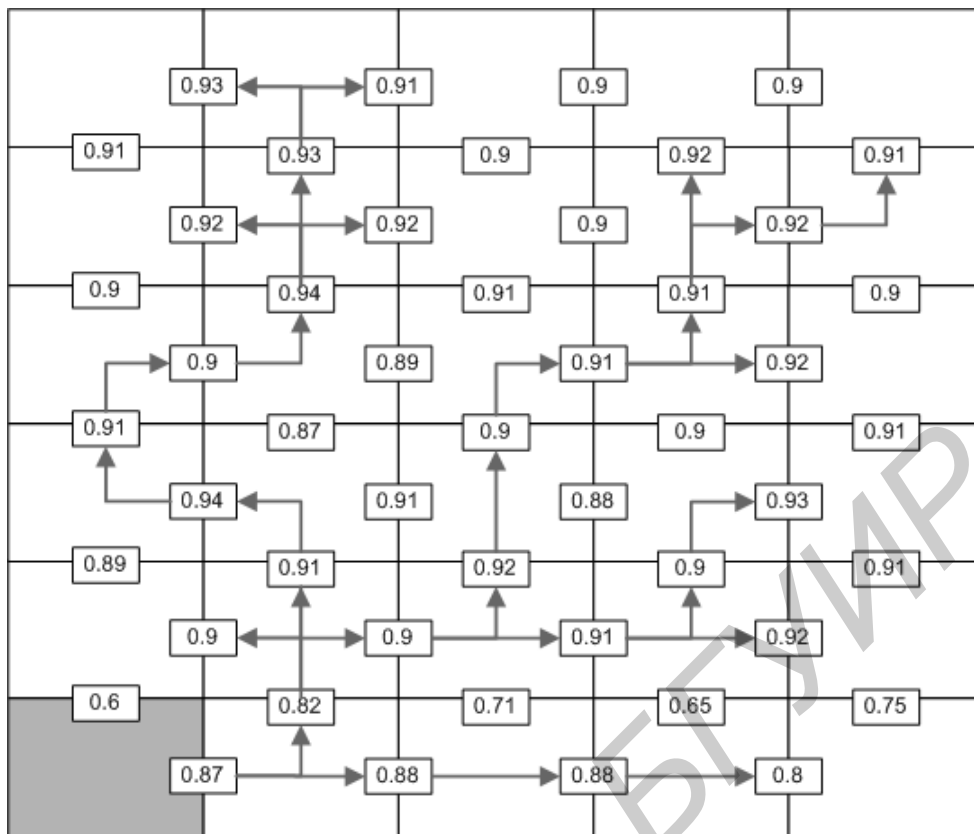


Рис.2. Пример карты оценок качества перекрытий, с полным маршрутом сшивки

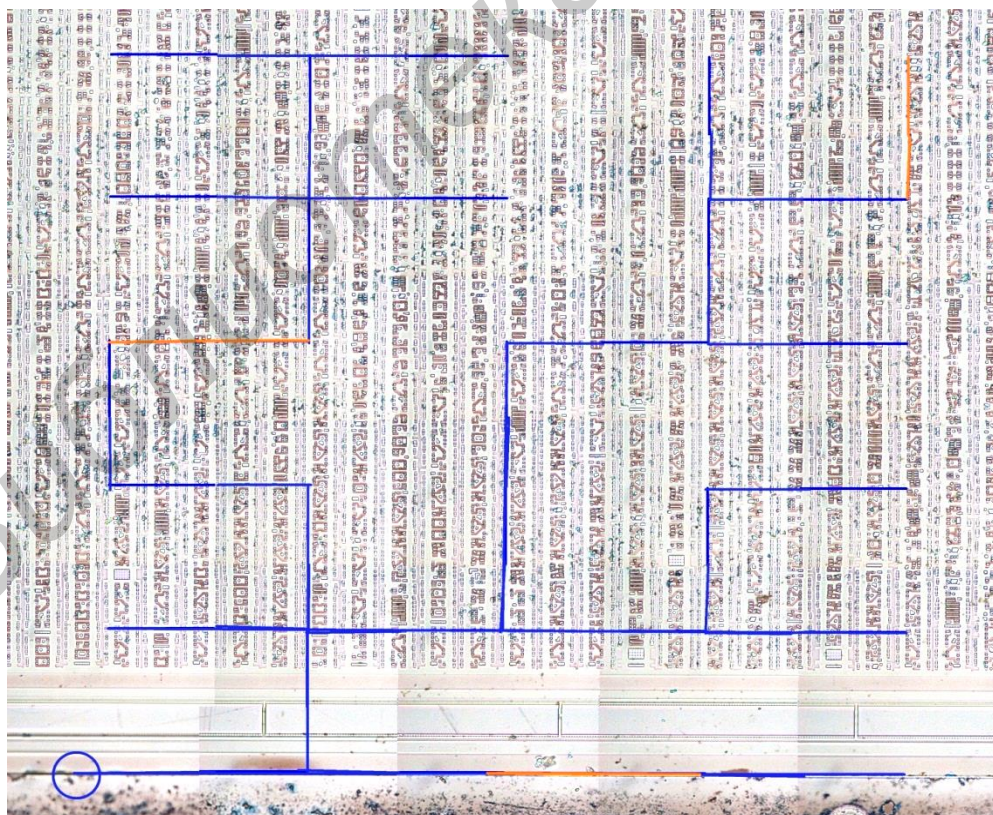


Рис. 3 – Результат коррекции расположения кадров и полный маршрут сшивки, оранжевым отмечены пути с дополнительной обратной корректировкой

Оптимизация алгоритма. Для большого количества кадров в слоях топологии ИС вычисление ключевых точек в области перекрытия с последующим сопоставлением приводит к значительному увеличению времени обработки одного слоя ИС.

Оптимизация выполняется на основании следующих ограничений:

1. Поиск смещений кадров ведется только в области перекрытия данных кадров и небольшой окрестности области перекрытия (размер окрестности меньше размера области перекрытия).

2. Искомый шаблон не имеет искажений геометрических характеристик на изображениях кадров.

С учетом данных ограничений алгоритм сшивки кадров может быть расширен с использованием метода скользящего просмотра. Идея метода основана на поиске максимума корреляции имеющегося шаблона на заданной области поиска (рис. 4). При этом осуществляется последовательное сопоставление имеющегося образца с изображением в каждой точке.

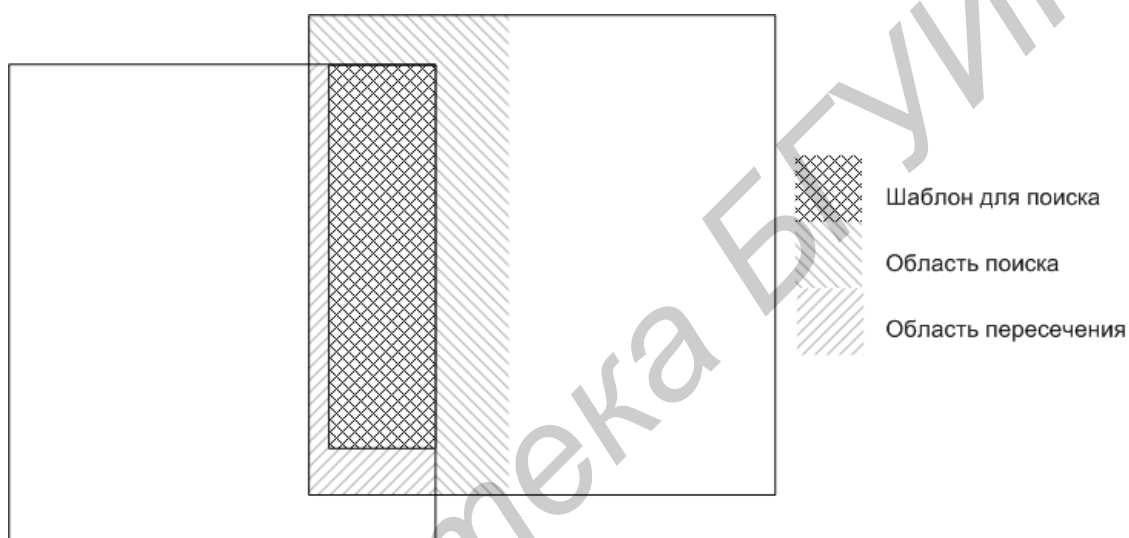


Рис. 4. Схема расположения области поиска и шаблона поиска для двух кадров ИС

Отсюда первый этап алгоритма будет следующим для всех соседних изображений кадров в области перекрытия:

1. Вычисление максимума корреляции в области перекрытия двух кадров.
2. Если найден единственный максимум, то переход п.б
3. Выполняется поиск ключевых точек и вычисление их дескрипторов.
4. Выделяются соответствующие друг другу ключевые точки.
5. Выделяется поднабор точек максимального размера с одинаковыми параметрами смещений, оставшиеся точки отбрасываются как ложные.
6. Вычисляются смещения и оценки качества для пар кадров.

Тестирование с использованием библиотеки `openCV` показало, что вычисление максимума корреляции выполняется в 3 раза быстрее, чем поиск ключевых точек и вычисление дескрипторов. При этом в зависимости от входных данных, корректно единственный максимум определяются для 70-97% пар кадров.

Заключение. Модуль, реализующий алгоритм, разработан на основе библиотеки алгоритмов `OpenCV`, и на базе кросс-платформенного инструментария `Qt`, данный модуль входит в состав программного комплекса обработки и анализа изображений. Использование программных средств коррекции сшивки и идентификации объектов в СТЗ для контроля технологических процессов изготовления СБИС позволило создать основу для дальнейшей работы по восстановлению принципиальной электрической схемы ИС и повысило качество работы проектировщиков СБИС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дудкин, А.А. Построение полного изображения топологического слоя интегральной схемы из совокупности перекрывающихся кадров / А.А. Дудкин // Вестник БрГТУ.- 2014.-№ 5 (89): Физика, математика, информатика. - С. 12-17.
2. Lowe, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints / D. G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – Vol. 60, Issue 2. – Hingham: Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 91–110.
3. SURF: Speeded Up Robust Features /H. Bay [etc.] // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). – Vol. 110, No. 3. –Amsterdam: Elsevier, 2008. – P. 346–359.
4. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / E.Rublee [etc.] // International Conference Computer Vision on. IEEE. – Barcelona, 2011. – P. 2564–2571.

Библиотека БГУИР